

13.56MHz 유도 결합 플라즈마에서의 강자성체 페라이트 코어의 효과

이원기, 이경효, 정진욱[†]

서울시 성동구 행당동 한양대학교 전기공학과

The effect of ferrite cores on the inductively coupled plasma driven at 13.56MHz

WonKi Lee[†], KyeongHyo Lee, and ChinWook Chung[†]

Dept. of Electrical Engineering, HanYang University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Due to high permeability of the ferrite core, the characteristics of the ICP are expected to be greatly improved. We investigated the effect of the ferrite cores on conventional inductively coupled plasma. It was observed that the current and voltage in the ICP antenna are slightly decreased and the power transfer efficiency is increased. However, due to eddy current and hysteresis loss, plasma density in the ICP with the ferrite cores is not increased. It seems that the ICP with the ferrite cores at low frequency (~100kHz) will be greatly improved since the losses at the low frequency can be negligible.

Key Words : Inductively coupled plasma, ferrite core, plasma source, power transfer efficiency

1. 서론

랑뮤어(Langmuir)와 그의 동료들은 1920년 고전류 진공관을 개발하는 동안 플라즈마의 여러 현상들을 처음으로 연구하였으며, 이온화되어 있는 기체를 플라즈마라고 최초로 부른 사람도 랑뮤어이다. [1]

우주를 이루고 있는 물질의 99%가 원자상태에서 전하를 띤 이온과 전자로 분리되어 플라즈마 상태로 존재한다. 항성의 내부와 대기, 가스 성운, 성간물질 등이 모두 플라즈마이다. 주변에서 쉽게 볼 수 있는 백열등이나 네온사인 외에도 번개불, 오로라, 로켓 추진체 등이 모두 플라즈마 상태인 것이다. [2]

엄밀하게 플라즈마는 집단행동(collective behavior)으로 특정지어지는, 중성입자와 전하를 띤 입자들의 준중성(quasi-neutral) 기체로 정의될 수 있다. 플라즈마를 사용하는 공정 기술은 마이크로 전자 소자, 집적 소자 제조에 핵심적인 기술이며 VLSI 제조에서는 플라즈마를 이용한 박막 증착과 식각이 없다면 현재나 다음 세대의 소자들을 만들 수 없을 정도이다. [1]

일반적인 RF ICP(Inductive coupled plasma)의 경우 챔버 옆 또는 위에 안테나를 설치하고, 안테나 전류에 의해 챔버 내부로 전기장을 유도하여 플라즈마를 발생시킨다. 기존 ICP의 경우 안테나에 수 kV의 전압이 인가되어 capacitive coupling에 의한 sputtering이 발생하고, window

에 손상이 가해지게 되며, 이로 인해 플라즈마에 오염이 발생하게 된다, 또한 안테나 전류가 수 A에서 수십 A에 달해 인해 안테나에서 상당량의 전력이 소모된다.

플라즈마 발생을 원활히 하고 이러한 문제들을 개선하기 위해 다각도로 연구가 진행되고 있으며, 다양한 형태의 ICP들이 제작되고 있다 [2].

그 중 한 방법이 일반적인 ICP에 ferrite를 사용한 ferrite ICP이다[3].

2. 실험 방법

2.1 페라이트 코어

ferrite core는 강자성체로 페라데이 유도법칙에 의해 다음과 같은 전기장이 유도된다.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t = -\mu \partial \mathbf{H} / \partial t$$

$$E \propto \omega \mu I_a$$

위 식에서와 같이 유도되는 전기장은 구동주파수와 페라이트 코어가 가지는 상대 투자율 그리고 안테나 전류에 비례하는 것을 알 수 있다.

하지만 ferrite core의 상대 투자율이 구동주파수와 관련성을 갖기 때문에, 상대 투자율이 큰 페라이트에 높은 주파수의 신호를 인가한다고 해서 아주 강력한 전기장이 유도되는 것은 아니다. 페라이트 코어의 상대투자율 조사 결과, 크게 2 종류로 구분할 수 있었다. 낮은 주파수에서는 아주 큰 상대투자율을 갖지만 MHz 대역으로 넘어가면 1%이하로 급격히 떨어지는 종이 있었다. 또 한 종류는 넓은 주파수 대역에서 일정한 상대투자율을 나타내었다.

이러한 ferrite core 자체의 특성으로 ferrite core의 구동주파수의 선택에 제한된다.

2.2 페라이트 ICP 구성도

페라이트 ICP는 ferrite 코어의 높은 상대 투자율에 의해 유도되는 전기장을 이용하기 위해 기존 ICP 시스템에 ferrite core를 응용한 ICP이다.

ferrite core에 코일을 감는 방식에 따라 유도되는 전기장과 자기장의 방향이 바뀌는데, 이는 그림 1에 나타내었다. 그림 1. (a)는 ferrite core에 안테나 코일을 감은 형태이고, (b)는 ferrite core와 동심원 형태로 안테나 코일 위에 ferrite core를 올려놓은 형태이다. (a)의 경우 유도되는 전기장은 ferrite core의 내부원을 통과하는 방향이고, (b)의 경우 ferrite core와 동심원 형태로 전기장이 유도된다.

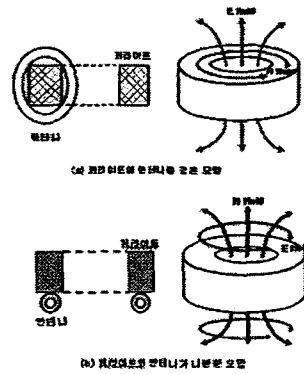


Fig. 1. The configuration of the Electric field and magnetic field around the antenna.

2.3 실험장치

그림 2 에 실험장치의 개략적인 모습을 나타내었다. chamber 는 지름 200mm, 높이 150mm 의 파이렉스로 제작되었다. chamber 아래 부분을 통하여 gas 의 주입과 배기가 이루어진다. Rotary oil pump 로 먼저 배기하고 turbo molecular pump 로 고진공 상태를 유지한다.

가스는 아르곤을 사용하였고, MFC 를 이용하여 유량을 조절하여 압력을 조절한다.

13.56 MHz 의 RF generator 를 사용하여 전력을 공급하고 진공가변축전기를 이용한 임피던스 정합회로를 통해 전력을 안테나로 전달한다.

2.4 안테나

페라이트에 의한 영향을 측정하기 위해 그림 1 과 같이 안테나를 설치하였다. Ferrite 와 동심 원 모양인 그림 1. (b) 형태보다는 ferrite 에 안테나를 감는 형태인 그림 1. (a)가 ferrite 의 영향을 크게 보여 준다. 하지만 이번 실험은 ferrite 의 영향을 보기 위한 것으로 다른 모든 조건을 동일하게 하면서 ferrite 의 설치와 제거가 용이하게 하기 위해 그림 1. (b) 형태로 안테나를

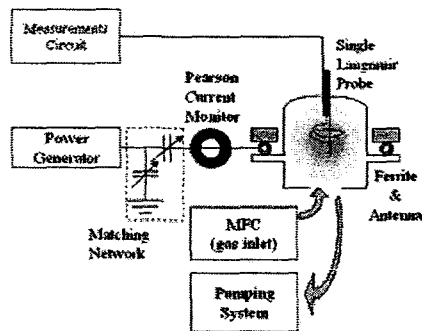


Fig. 2. The schematics of the experimental setup.

제작하여 실험 하였다

안테나는 5mm 은도금된 구리 튜브를 사용하였고, 내부로 물을 흘려 냉각시킨다. 페라이트와 직접 접촉하지 않도록 하기 위해 외부를 테프론 튜브로 둘러 썼다. 안테나에 power 가 인가되면 루프를 따라 전류가 흐르고, ferrite 에 주위를 감싸는 형태로 자기장이 유도되고, 이 자기장에 의해 θ 방향으로 유도 전기장이 형성된다. 이 전기장이 전자를 가속시키고 plasma discharge 를 이끌어내게 된다.

페라이트는 도넛 형태로 외경 242mm, 내경 175mm, 높이 20mm 이다. 상대투자율은 수백 kHz~수십 MHz에 걸쳐 5.4 내외의 일정한 값을 나타내었다.

2.5 전력전달 효율 측정

안테나에 흐르는 전류는 pearson current probe 로 측정하였다. 안테나에 흐르는 전류를 측정을 통해 efficiency 를 계산하였다.

$$P_{in, no\ plasma} = I_a^2 R_c \rightarrow R_c = P_{in, no\ plasma} / I_a^2 \quad (1)$$

$$P_{in, plasma} = I_a'^2 R_c \rightarrow R_c = P_{in, plasma} / I_a'^2 \quad (2)$$

$$P_p = I_a'^2 R_c - I_a^2 R_c \quad (3)$$

$$\eta = \frac{R_c - R_c'}{R_c} \times 100 \quad (4)$$

그림 2 에서와 같이 식(1)의 I_a 는 플라즈마가 없을 때의 안테나 전류이고, 식(2)의 I_a' 는 플라즈마가 있을 때 안테나를 흐르는 전류다. R_c 는 입력 power 와 측정한 안테나 전류와의 관계에서 구한 저항 값으로, 여기에는 전송선로, matching network, 안테나 등 모든 저항 성분이 포함된 값이라 할 수 있다. R_c' 는 R_c 에 플라즈마 저항 R_p 가 더해진 것으로 모델링 할 수 있다. 따라서 전체 공급 전력과 플라즈마에서 소모하는 전력 P_p 로 전력 전송 효율을 구할 수 있다. 전력과 저항은 1차적으로 비례하므로 저항 비로도 효율을 나타낼 수 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

Ar 가스를 이용하여 압력 1mTorr 에서 실험하였다.

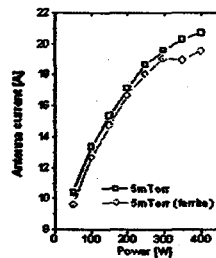


Fig. 3. the antenna current as a function of power at 1mTorr

그림 3 에서와 같이 페라이트가 추가 되었을 때 전류가 감소하는 것을 볼 수 있다. 전류의 감소는 안테나 및 전력 전송 시스템에서 발생하는 전력의 소모를 줄여 전체적인 효율 향상에

기여하게 된다. 실제 전류 감소량은 1~2A 정도로 크지 않았으며, 이는 고주파 전력 원을 사용하여 페라이트에 의한 소모가 크고, 상대 투자율 값 자체가 너무 작아 강한 유도 전기장이 생성되지 못했기 때문으로 보인다.

그림 4 는 입력 전력 대비 전력 전송 효율을 나타낸 것으로 낮은 파워에서는 페라이트를 사용한 경우가 효율이 좋지만 전력이 높아질수록 효율은 비슷해지는 것을 알 수 있다. 이는 밀도가 높을수록 ICP 발생 효율이 높아지기 때문에 어느 밀도 이상에서는 페라이트가 있는 경우와 없는 경우가 거의 차이가 없게 된다.

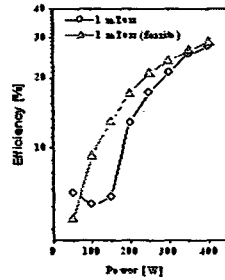


Fig. 4. Power transfer efficiency at 1mTorr

그림 5 는 플라즈마 밀도 변화를 나타낸 것이다. 그림 4 에서 본 것 같이 낮은 전력에서 밀도는 약간 더 페라이트를 사용한 경우가 높다. 이는 페라이트에서 발생하는 전력 소모 즉, eddy current 와 히스테리시스에 의한 것이 나아진 전력 전송 효율을 상쇄시킨다는 것을 의미한다. 결국 페라이트를 사용하였을 때 플라즈마 발생 효율이 좋아지지만 그 효과가 크지 않은 것을 볼 수 있다.

4. 결론

13.56 MHz 전력 원을 이용한 플라즈마 발생에서 ferrite core 에 의한 영향을 보기 위한 실험으로, 안테나가 챔버와 다소 멀리 설치된 점이나, ferrite core 에 안테나를 감는 방법적인 측면에서 볼 때, 효과적인 전력 전달적인 측면은 중점적으로 고려되지는 않았다고 할 수 있다. 때문에 ferrite core 의 효과를 크게 볼 수 없었다.

안테나를 감는 방법을 바꾸고, 수 백 MHz 대역의 낮은 주파수의 전력 원을 사용하면 상대 투자율이 1000 을 상회하는 ferrite core 를 사용할 수 있어 보다 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이라 생각된다.

또한 시스템 구축의 편리성이나 비용적인 측면에서도 낮은 주파수를 이용한 방전이 장점이 많을 것으로 사료된다.

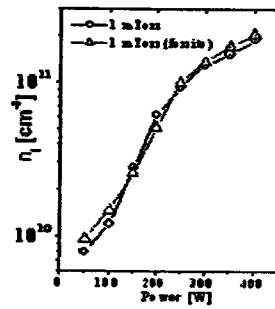


Fig. 5. Plasma density at 1mTorr

감사의 글

본 연구에 페라이트에 대한 동기를 준 Dr. V. A. Godyak 과 페라이트 구매와 기술적인 도움을 준 뉴파워 플라즈마 여러분에게 감사를 드린다.

참고문헌

1. 정진욱, 공정 플라즈마 기초와 응용, 청문각, 2002.
2. J. Hopwood, "Review of inductively coupled plasmas for plasma processing," Plasma Sources Sci. Technol., Vol. 1, pp. 109-116, 1992.
3. T. Meziani, P Colpo, and F Rossi, "Design of a magnetic-pole enhanced inductively coupled plasma source ", Plasma Sources Sci. Technol. Vol. 10, pp.276-283.